利用環控設施生產植物蛋白之可行性探討

農試所遺傳生技組 劉威廷　農試所農化組 吳宗諺　農試所產服中心 莊凱恩 林盈甄
農試所轉譯中心 黃裕榆　農試所嘉義分所 李柔誼　林業及自然保育署新竹分署 陳怡如

一、前言

隨著全球氣候變遷、重視動物福祉以及健康意識提升，植物基飲食 (plant-based diet) 如植物肉、植物奶、植物蛋以及衍生相關產品，逐漸成為重要趨勢，尤其重視生產過程有較低的溫室氣體排放 (圖一)。植物基飲食主要訴求功能及營養可替代動物來源食品，其中以大豆和豌豆蛋白因豐富的營養成分和功能特性，被廣泛應用於植物肉的製造，藉此模擬真實肉類的質地和風味 (Cameron et al. 2019)，並具有碳足跡較低的優點，因此，植物蛋白被視為未來重要的蛋白質來源，且市場需求仍將持續成長。根據彭博新聞社發布的市場分析預測，植物基飲食的全球零售市場將從2020年的294億美元增長至2030年的1,619億美元 (圖二)。植物基飲食在市場上備受矚目，其營養平衡性亦受到關注。研究指出，植物基飲食者的BMI（體重指數）普遍較低，並且其膳食纖維、維生素C、胡蘿蔔素、鎂和鉀的攝入量明顯高於葷食者。植物基飲食富含抗氧化劑，對人體有益，但在極度飲食不均衡下可能導致維生素D、鈣、維生素B_{12}等攝取不足(Rizzo et al. 2013)。

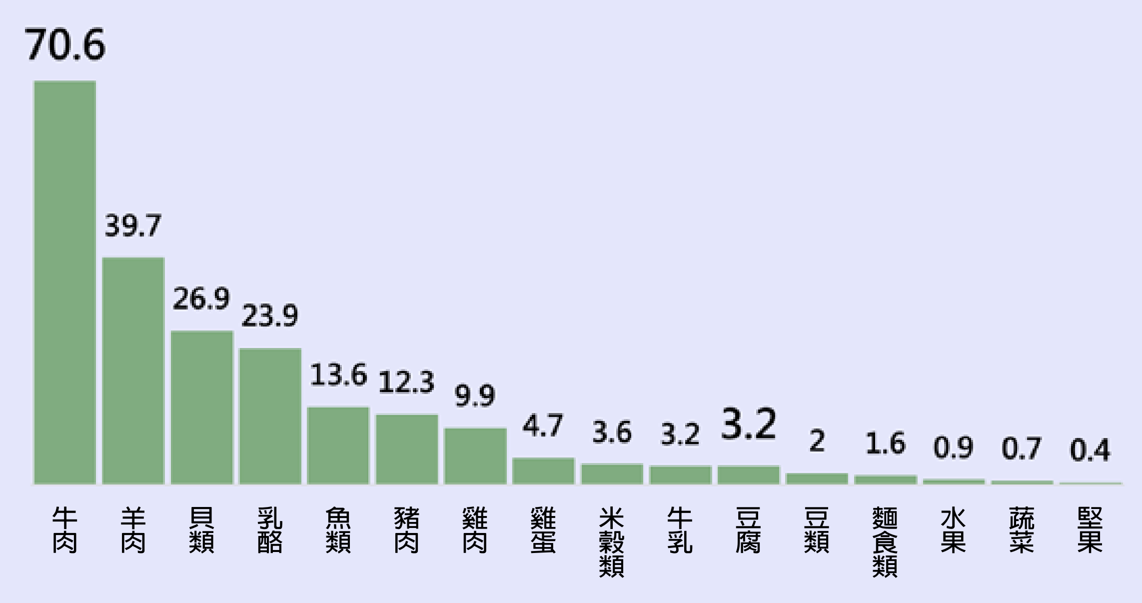
為了滿足不斷增長的市場需求，植物蛋白工廠的概念逐漸形成，內容涵蓋原料種植、培養、加工階段，包含生產純化的植物蛋白，以及結合供應鏈的自動化與智慧化。環控栽培 (controlled environment agriculture，CEA) 是建立一套自主運作的系統，以提高生產效率，使作物在最適環境條件下生長，能增加單位生產面積、最大化蛋白質的產量 (Geilfus 2019)。本文挑選7種適合臺灣之植物蛋白潛力作物，探討利用環控設施生產之可行性。

二、環控栽培的優勢與機會

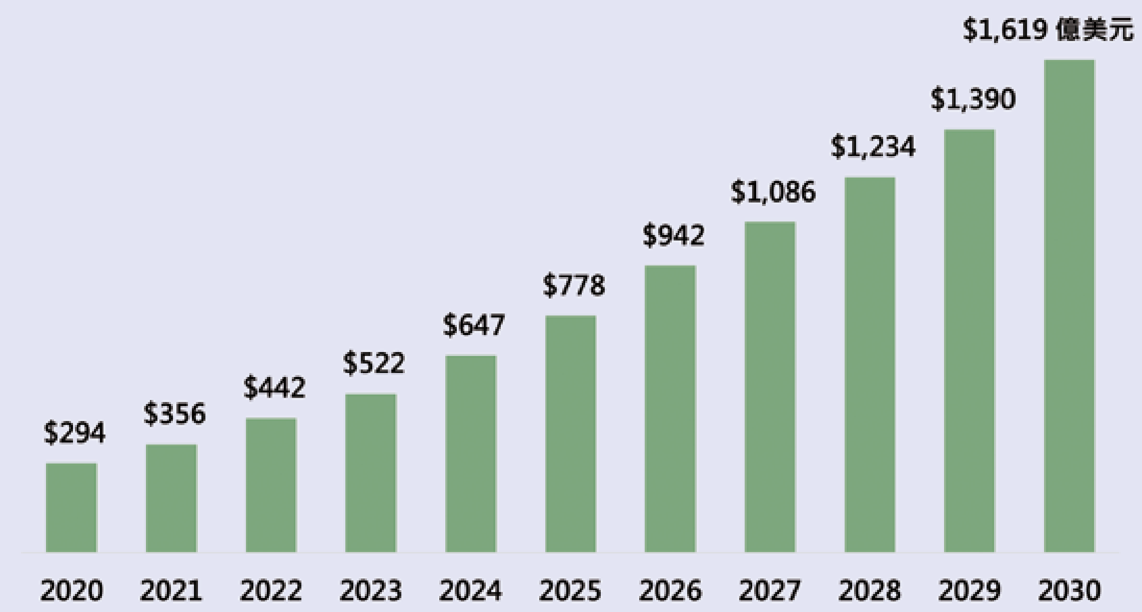
相較於傳統農業，CEA可降低季節和氣候變化的影響，能夠全年穩定生產，使作物生長不受天氣或其他自然因素的限制。CEA系統的封閉式循環技術可提高水資源和養分的利用效率，研究

作　　者：劉威廷助理研究員
連絡電話：04-23317333

顯示，CEA在水資源利用僅需傳統灌溉的十分之一或更少，能降低水資源的耗損。養分管理上，CEA能精確控制氮、磷和鉀等元素的供應，避免養分浪費及污染風險，有助環境的永續性 (Geilfus 2019)。儘管CEA能夠提供穩定且高效的生長環境，但其能源需求高成為主要限制。CEA依賴人工光源、溫控系統和自動化設備，以創造最佳的植物生長條件。然而，長時間光照會消耗大量電



圖一、生產每公斤食物溫室氣體排放量 (公斤)。資料來源：2022年聯合國政府間氣候變遷專門委員會 (IPCC) 氣候變遷評估報告。



圖二、全球植物基飲食零售市場規模。資料來源：2019年彭博新聞社植物基飲食市場分析預測報告。

力，未來可藉由再生能源降低營運成本，例如太陽能、風能和地熱能等，高效節能的LED光源也能降低照光成本。此外，精確調控的光譜技術使植物在較低光度下亦可保持高生長效率、減少能源需求 (Geilfus 2019)。

CEA設施的初期建設成本和技術門檻較高，包括自動化設備、建築及專業技術的投入，因而限制其發展性與普及性。目前，中小型企業或個體農戶仍難以承擔CEA系統的設置費用，不過隨著自動化技術的進步和設備成本的逐步下降，這一情況可得到改善。未來，政策支持也將有助於推廣CEA系統的應用，若能由政府投資和補貼，企業將更有動力進行技術研發並擴大應用範圍。

三、適於生產植物蛋白之潛力物種

(一) 浮萍（Duckweed, *Lemnaceae*）

浮萍以其極高的蛋白質含量和快速生長的特性，具有作為植物蛋白重要來源之潛力。以乾重而言，其蛋白質含量可達45%，且含有多種必需胺基酸，營養成分接近動物蛋白，然而，浮萍細胞壁內的多醣影響蛋白質的萃取效率，需進一步開發高效的萃取技術 (Edelman and Colt 2016)。在適宜的環境下，浮萍的倍增時間僅為1.24天，這使其具備連續生產的優勢。浮萍的CEA系統具有顯著的栽培優勢，經由控制光照、溫度和CO_2濃度，可以加速浮萍生長，此意謂蛋白質產量亦增加，此外，植體小的水耕浮萍栽培層架，僅需在上方保留5公分高度，可以有效達成氣體交換、降低光度需求（50-400 μmol $m^{-2}{\cdot}s^{-1}$），並可設計多層疊放，以發揮最大空間利用率 (圖三)。

(二) 紅藻（Red Seaweed, *Rhodophyta*）

紅藻的蛋白質含量在海藻類中位居前列，某些品種的蛋白質含量可達47%（乾重），含量和組成均接近動物蛋白，紅藻還富含多酚、類胡蘿蔔素和維生素等，具有抗氧化和抗發炎功能。紅藻蛋白的萃取需要特定預處理，才能提升其效率，或是運用酵素輔助萃取，以提高紅藻蛋白的營養價值和食品功能

圖三、室內浮萍環控栽培堆疊設計 (Petersen et al. 2022)。

性。此外，紅藻蛋白可運用於微膠囊化(microencapsulation)食品，以塗層包圍微小顆粒或液滴，形成特定用途的小膠囊。在消費面部分，藻類食物普遍存在於亞洲人的食品清單中，而西方人的接受度仍待培養。在生產面部分，CEA可以模擬海洋環境栽培紅藻，克服海洋環境存在各種難以預測的變化，使紅藻穩定生長和累積蛋白質，因此有機會擴大發展為商業模式 (Rawiwan et al. 2022)。

(三) 苜蓿（Alfalfa, *Medicago sativa*）

苜蓿因富含蛋白質和營養成分而廣泛利用於動物飼料。乾重蛋白質含量高達50.8%，包含所有必需胺基酸，是優質植物蛋白來源。苜蓿因水分和養分需求較低，在環控設施中的栽培效率高，且種植空間需求小，生長快速、需肥量低、採收率高，蛋白純化製程簡單、成本低。苜蓿的蛋白萃取技術包括酸沉澱、膜過濾、發酵法等，這些技術已可被應用於食品和保健品生產中。苜蓿作為植物基蛋白的潛力巨大，但仍需提升其適口性和市場接受度 (Hadidi et al. 2023)。

(四) 綠豆（Mung Bean, *Vigna radiata*）

綠豆蛋白質含量在19.5%至33.1%之間，廣泛用於植物基產品中，特別是植物蛋產品，經調味加工後可製作成外觀與口感相似的炒蛋料理。環控設施中，綠豆栽培週期短，從播種至收穫僅需10至12週。CEA技術提供精準控制光照和溫度，有效提升綠豆的胺基酸濃度和蛋白質含量。另一方面，綠豆缺乏甲硫胺酸和胱胺酸等含硫胺基酸，未來產品化需留意強化、平衡必需胺基酸含量 (Yi-Shen et al. 2018)。

(五) 花生（Peanut, *Arachis hypogaea*）

花生中的蛋白質含量約為25%，和大豆、豌豆一樣是優良植物蛋白來源，榨過油脂後的副產物花生油粕，其蛋白質含量更高，可達47%-55%。將花生進行預處理和酵素輔助萃取，可提高蛋白的營養價值和食品功能性。雖然花生在蛋白質含量上具有優勢，但仍需應對其含有過敏原和黃麴毒素等問題，此外，花生蛋白同樣缺乏甲硫胺酸和賴胺酸，因此在實際應用中需搭配其他蛋白質以獲得營養平衡性 (Hariharan et al. 2023)。

(六) 矮性菜豆 (Green bush bean, *Phaseolus vulgaris*)

矮性菜豆 (四季豆) 富含蛋白質、膳食纖維與維生素，植株低矮（30-50公分）、適用水耕、生產週期短（55-65天），具有進入CEA的潛力，但仍須對合適的品種進行篩選，探討株高、收穫指數等面向，此外，矮性菜豆有葉片互相遮蔭的問題，為了提升生產效率，可運用樹冠內補光的方式提高光合作用效率 (Stoochnoff et al. 2022)。

(七) 真菌蛋白（Mycoprotein）

真菌蛋白是近年受到矚目的蛋白質來源，含量達45%-55%，富含所有必需胺基酸，其中真菌*Fusarium venenatum*以食品級液態營養基培養，經熱處理及安全性確認，英國食品公司將此真菌蛋

白加入結著劑、調味劑等食品添加物，加工成為植物肉，以Quorn品牌上市已近30年。真菌蛋白生產過程中的碳足跡較低，且可使用農業剩餘資源作為培養基，實現資源再利用 (Finnigan et al. 2024)。如同菇類，真菌蛋白適合在環控設施中栽培，甚至可以在液態培養系統中生長。然而，真菌蛋白的風味與傳統蛋白質存在差異，且生產成本仍高於大豆蛋白，降低成本並改進真菌蛋白的風味和質地將是其進一步普及的關鍵。

四、展望

CEA為植物蛋白的生產帶來了創新與變革，藉由對環境條件的精確控制，CEA可大幅提升生產效率、穩定性和資源利用率，使蛋白質生產不受季節和氣候限制。隨著LED光源、智慧監控等技術的進步，已使作物生產效率大幅提升，然而，CEA的建造成本、能源需求高，而市場接受度的不確定性等挑戰仍是關鍵課題。另一方面，隨著全球氣候變遷、農業用地取得成本增加、勞動力短缺等因素，未來CEA發展或能作為因應上述困境的解方之一，若以生產植物蛋白取代動物蛋白為目的，可以帶來減低生產糧食碳排的效益。本文綜合上述各項作物之特性，初步評估未來在CEA中栽培之合適性，整理於表一，以現階段技術而言，浮萍、苜蓿與真菌最適於CEA種植，且蛋白質含量也相當高，若以蛋白質相關產品而言，則以豆科作物的菜豆、綠豆、花生最適合，真菌則可結合不同原料製作創新食品。此外，除了考量上述作物作為機能性食品原料，亦可以導入循環農業應用等價值。農試所長期積極研究植物蛋白潛力作物之種原篩選、營養成分差異、加工特性變化等，可望未來能對提供新的植物蛋白選項，為農業創新發展盡一份心力。

總而言之，CEA系統為植物基蛋白生產提供高效的模式，能符合全球蛋白質供應及環境永續的需求，具有發展潛力。在政策支持、技術創新和市場需求的推動下，植物基蛋白的未來市場仍有許多發展空間，並有助於推動健康且永續的飲食文化變遷。

表一、本文初步評估與整理浮萍、紅藻、苜蓿、真菌、矮性菜豆、綠豆、花生之CEA適栽性、蛋白質產量、產品化程度與附加價值。

物種	CEA適栽性	蛋白質產量	產品化程度	附加價值
浮萍	★★★★★	45 g/100 g	★★	具開發機能性食品之潛力
紅藻	★★★	47 g/100 g	★★★	具開發機能性食品之潛力
苜蓿	★★★★★	50.8 g/100 g	★★★	具開發機能性食品之潛力
真菌	★★★★★	5-56 g/100 g	★★★★★	栽培介質可應用於循環農業
矮性菜豆	★★★★	21 g/100 g	★★★★★	
綠豆	★★★★	19.5-33.1 g/100 g	★★★★★	具開發機能性食品之潛力
花生	★	25 g/100 g	★★★★	

註：★表示評估潛力，★愈多愈有潛力。

五、參考資料

Cameron B, Neill SO, Bushnell C. 2019. Industry Report Plant-based Meat , Eggs , and Dairy Primary authors : Contributing authors : (June):1–38.

Coughlan NE, Bolger P, Burnell G, Leary NO, Mahoney MO, Paolacci S, Wall D, Jansen MAK. 2022. Duckweed bioreactors : Challenges and opportunities for large-scale indoor cultivation of Lemnaceae. 336:130285. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.130285.

Edelman M, Colt M. 2016. Nutrient value of leaf vs. seed. Front Chem. 4(JUL):2–6. https://doi.org/10.3389/fchem.2016.00032.

Finnigan T, Mach K, Edlin A. 2024. Mycoprotein: a healthy new protein with a low environmental impact, p 539–566. Sustainable protein sources. Elsevier.

Geilfus C-M. 2019. Controlled environment horticulture. Improving Quality of Vegetables and Medicinal Plants; Springer: Cham, Switzerland. :1–233.

Hadidi M, Orellana Palacios JC, McClements DJ, Mahfouzi M, Moreno A. 2023. Alfalfa as a sustainable source of plant-based food proteins. Trends Food Sci Technol. 135(January):202–214. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2023.03.023.

Hariharan S, Patti A, Arora A. 2023. Functional Proteins from Biovalorization of Peanut Meal: Advances in Process Technology and Applications. Plant Foods for Human Nutrition. 78(1):13–24. https://doi.org/10.1007/s11130-022-01040-8.

Petersen F, Demann J, Restemeyer D, Olfs H-W, Westendarp H, Appenroth K-J, Ulbrich A. 2022. Influence of light intensity and spectrum on duckweed growth and proteins in a small-scale, re-circulating indoor vertical farm. Plants. 11(8):1010.

Rawiwan P, Peng Y, Paramayuda IGPB, Quek SY. 2022. Red seaweed: A promising alternative protein source for global food sustainability. Trends Food Sci Technol. 123(March):37–56. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2022.03.003.

Rizzo NS, Jaceldo-Siegl K, Sabate J, Fraser GE. 2013. Nutrient profiles of vegetarian and nonvegetarian dietary patterns. J Acad Nutr Diet. 113(12):1610–1619.

Stoochnoff J, Johnston M, Hoogenboom J, Graham T, Dixon M. 2022. Intracanopy lighting strategies to improve green bush bean (Phaseolus vulgaris) compatibility with vertical farming. Frontiers in Agronomy. 4(July):1–16. https://doi.org/10.3389/fagro.2022.905286.

Yi-Shen Z, Shuai S, Fitzgerald R. 2018. Mung bean proteins and peptides: Nutritional, functional and bioactive properties. Food Nutr Res. 62:1–11. https://doi.org/10.29219/fnr.v62.1290.